

CARACTERIZAÇÃO DE REBOCOS DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E DE CAL HIDRÁULICA NATURAL COM METACAULINO E RESÍDUOS CERÂMICOS EM EXPOSIÇÃO NATURAL

Paulina Faria*, Joana Costa, Tomás Lourenço, Tiago Figueiredo e Vitor Silva

Dep. Eng. Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica
paulina.faria@fct.unl.pt, jrr.costa@campus.fct.unl.pt, tc.lourenco@campus.fct.unl.pt,
ta.figueiredo@campus.fct.unl.pt, vmd.silva@fct.unl.pt

Palavras-chave: Reboco, Argamassa, Cal aérea, Cal hidráulica natural, Metacaulino, Resíduo de cerâmica

Resumo. *Nos dias de hoje é cada vez mais importante, em todas as áreas, a valorização de resíduos, não só de modo a contribuir para a conservação do meio ambiente mas também por questões de economia e de eficiência. No caso dos resíduos cerâmicos, estes podem atuar nas argamassas como agregados, como filleres ou como pozolanas. As pozolanas são materiais que, em conjunto com ligantes que contenham hidróxido de cálcio e na presença de água, reagem e constituem produtos hidratados, podendo substituir parcialmente os ligantes das argamassas. Geralmente tornam essas argamassas mais duráveis e ecoeficientes.*

No artigo são caracterizados rebocos realizados em muretes experimentais de alvenaria de tijolo furado da Estação de Exposição Natural do Departamento de Engenharia Civil da FCT UNL, localizada em zona semi-rural, perto da costa Atlântica. Os rebocos são constituídos por diversas argamassas de cais com areia siliciosa: uma argamassa de cal aérea CL-90 S ao traço volumétrico 1:2; duas argamassas semelhantes mas nas quais 10% e 20% da massa da cal foram substituídos por um metacaulino comercial (Mk); uma argamassa de cal hidráulica natural NHL3.5 ao traço volumétrico 1:3; duas argamassas semelhantes mas nas quais 2,5% e 5% da massa da cal foram substituídos pelo mesmo Mk; quatro argamassas de NHL3.5 ao traço volumétrico 1:4 mas nas quais se procedeu à adição de 10% e de 25% (da massa de cal) de massa correspondente de dois resíduos cerâmicos de barro vermelho – um procedente de resíduos de tijolo furado e outro de ladrilhos de revestimento de parede. A caracterização é efetuada através de ensaios não destrutivos. Com esta campanha de ensaios pretende-se aferir o comportamento face à absorção da água, a compacidade, a dureza superficial e a deformabilidade. É feita uma análise comparando os rebocos em termos de ligante utilizado, da composição ligante:agregado, considerando o Mk e os resíduos cerâmicos e face à exposição dos rebocos (a Norte, em constante sombreamento, e a Sul, com exposição ao Sol e à incidência predominante da chuva e do vento).

Os resultados obtidos mostram que a substituição de cal por metacaulino em argamassas de reboco indicia ser interessante do ponto de vista da dureza superficial e da compacidade, reduzindo um pouco a deformabilidade dos rebocos e sem grande alteração ao nível da proteção face à absorção de água da chuva. Já a adição de resíduos de cerâmica a argamassas de reboco com fraco traço em ligante contribui para a trabalhabilidade no estado fresco, para o aumento da dureza superficial, sem ser prejudicial face à deformabilidade. Para além de permitir a formulação de argamassas com menor energia incorporada, contribui ainda para as resistências mecânicas das argamassas e principalmente para a melhoria do seu comportamento face à absorção de água da chuva, indiciando compatibilidade com alvenarias antigas.

1. INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, com a diminuição da construção civil em Portugal e a constante degradação do património edificado, tem vindo a ser cada vez mais importante investir na reabilitação e conservação de edifícios. Um elemento importante na reabilitação/conservação é a argamassa de reboco dado que o reboco constitui frequentemente a envolvente exterior das paredes, sendo aquele que está mais exposto. É assim o reboco o elemento construtivo que tem de conferir maior proteção à parede.

As argamassas de reboco utilizadas em reabilitação têm de ter como característica fundamental a compatibilidade com o suporte em que são aplicadas, de modo a poderem garantir a referida proteção. Assim sendo, as argamassas mais utilizadas em paredes mais antigas, tendo em consideração a referida compatibilidade, são as que utilizam como ligante a cal aérea ou a cal hidráulica, em função das características do suporte e das exigências funcionais requeridas.

Na construção civil já pelo menos desde a antiga Roma que são reaproveitados materiais para incorporação em argamassas, com o objetivo de melhorar o comportamento e a durabilidade face à presença de água e a outros agentes agressivos.

Os resíduos cerâmicos e outras argilas calcinadas são materiais que podem melhorar algumas características das argamassas em que são utilizados, como as resistências mecânicas e o comportamento à água, garantindo a compatibilidade com o suporte [1, 2]. Para além das características hidráulicas, as pozolanas proporcionam às argamassas por vezes maior trabalhabilidade e durabilidade, conferindo-lhes, nalguns casos, também uma maior resistência ao ataque dos sais [3, 4].

Uma pozolana é constituída por material silicioso ou silicioso e aluminoso que, por si próprio, não constitui um ligante mas que irá, se em partículas de granulometria reduzida e na presença da humidade, reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas correntes, para formar compostos hidratados, do tipo dos que se constituem a partir das reações de ligantes hidráulicos correntes [5].

O metacaulino é uma reconhecida pozolana artificial produzida a partir de tratamento térmico e moagem de caulino. O caulino é uma argila muito comum em Portugal e que também pode ser obtida a partir de resíduos industriais (por exemplo de lavagem de areias). O metacaulino é reconhecido como sendo uma pozolana de elevada reatividade. Esta é tanto mais elevada quanto maior o seu teor em sílica e/ou alumina no estado não cristalino (amorfo), que por sua vez depende da matéria-prima de origem e do tratamento térmico a que o caulino é sujeito, e maior a sua superfície específica, que depende da moagem [6].

A utilização destes materiais pode também contribuir, para além de aspetos técnicos, ainda em questões de economia e conservação do meio ambiente. A sua utilização para a produção de argamassas, faz com que este processo seja mais sustentável pois podem ser reintroduzidos no processo produtivo grandes quantidades de resíduos que, de outra forma, seriam depositados em aterro, contribuindo para a poluição do ambiente [7].

A utilização de metacaulino ou de resíduos cerâmicos em substituição parcial de ligante pode trazer, assim, inúmeras vantagens, como a redução de resíduos a depositar em aterro, a redução da extração de rochas por redução do consumo de ligante e a produção de argamassas com comportamento melhorado.

2. MATERIAIS, ARGAMASSAS E REBOCOS

No âmbito de um projeto de investigação em curso e na sequência de outro projeto designado por METACAL, já terminado, pretendeu-se aferir as características apresentadas por rebocos de argamassas com resíduos cerâmicos e compará-las com as apresentadas por rebocos de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com metacaulino. Foi assim realizada uma campanha experimental para caracterizar rebocos de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com substituições parciais do respetivo ligante por metacaulino e de argamassas de cal

hidráulica natural com traço mais fraco em ligante e adição de resíduos cerâmicos. Foi utilizada uma cal aérea CL-90S comercializada como Lusical H100, e a partir daqui designada por CL, e uma cal hidráulica natural NHL3.5 comercializada pela Secil, a partir daqui designada por NHL [8]. Foi utilizado um metacaulino comercializado pela Imerys como Argical M 1200S, a partir daqui designado como Mk. A caracterização química das cals e do metacaulino pode ser consultada noutras publicações [9, 10]. Foram utilizados dois tipos diferentes de resíduos cerâmicos (RC): um resíduo industrial de tijolo furado corrente, resultante de material cozido não conforme, designado por T; um resíduo de demolição e construção proveniente de cortes efetuados nos ladrilhos de barro vermelho utilizados para o revestimento exterior de um edifício, designado por L. Foi utilizada uma mistura de areias siliciosas graduadas, cuja curva granulométrica se apresenta na Figura 1, comparativamente à curva granulométrica da areia CEN de referência.

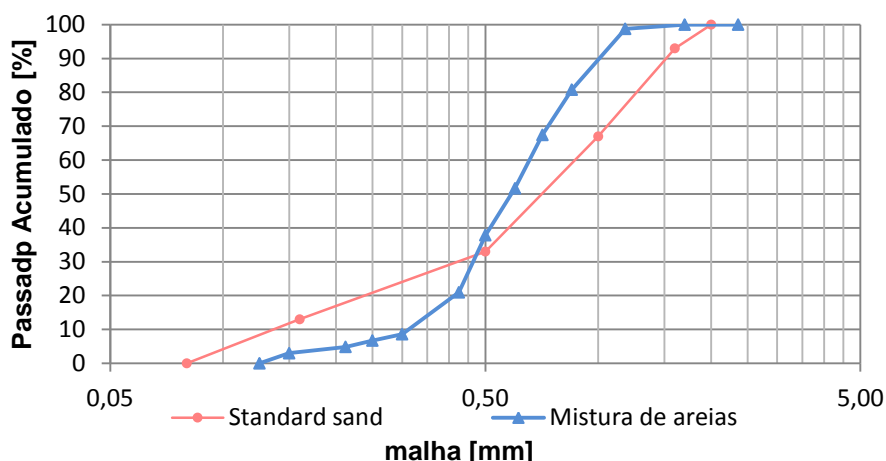


Figura 1. Curva granulométrica da mistura de areia utilizada e curva da areia CEN de referencia.

No âmbito de três dissertações de mestrado [11, 12, 13], foram realizadas as dez argamassas que a seguir se discriminam e que mais detalhadamente se apresentam na Tabela 1:

- CL – argamassa de cal aérea CL e areia, com traço volumétrico 1:2 de CL:areia;
- CL_10Mk – argamassa de cal CL com substituição de 10% da massa de cal por Mk, com traço volumétrico 1:2 de CL+Mk:areia;
- CL_20Mk – argamassa de cal CL com substituição de 20% da massa de cal por Mk, com traço volumétrico 1:2 de CL+Mk:areia;
- NHL – argamassa de NHL e areia, com traço volumétrico 1:3 de NHL:areia;
- NHL_2,5Mk – argamassa de NHL com substituição de 2,5% de cal por Mk, com traço volumétrico 1:3 de NHL+Mk:areia;
- NHL_5Mk – argamassa de NHL com substituição de 5% de cal por Mk, com traço volumétrico 1:3 de NHL+Mk:areia;
- NHL_10T – argamassa de NHL com traço volumétrico 1:4 de NHL:areia, com adição de 10% de resíduo cerâmico T;
- NHL_25T – argamassa de NHL com traço volumétrico 1:4 de NHL:areia, com adição de 25% de resíduo cerâmico T;
- NHL_10L – argamassa de NHL com traço volumétrico 1:4 de NHL:areia, com adição de 10% de resíduo cerâmico L;
- NHL_25L – argamassa de NHL com traço volumétrico 1:4 de NHL:areia, com adição de 25% de

resíduo cerâmico L.

As argamassas para aplicação nos rebocos nos muretes foram realizadas *in situ*, através de berbequim com pá misturadora. As quantidades de água utilizadas reproduziram as quantidades que tinham sido utilizadas previamente em laboratório para a formulação das mesmas argamassas. Apenas nas argamassas para aplicação do crespido se utilizou mais 10% de água da definida na Tabela 1. O material seco foi homogeneizado, a água foi introduzida e a amassadura mecânica decorreu durante alguns minutos considerados suficientes para uma conveniente amassadura.

Tabela 1. Designação, traços volumétrico e em massa, relação água/ligante e consistência por espalhamento das argamassas.

Argamassa	Traço Volumétrico Cal:(Mk ou RC):Ar	Traço Ponderal Cal:(Mk ou RC):Ar	Relação A/(Cal+ Mk ou RC)	Consistência [mm]
CL	1:0:2	1:0:7,8	1,2	141,0
CL_10Mk	1:0,14:2,22	1:0,1:8,6	1,2	134,1
CL_20Mk	1:0,31:2,5	1:0,25:9,7	1,2	136,7
NHL	1:0:3	1:0:5,7	1,2	170,1
NHL_2,5Mk	1:0,06:3	1:0,03:5,9	1,2	165,4
NHL_5Mk	1:0,13:3	1:0,05:6	1,2	163,6
NHL_10T	1:0,08:4	1:0,1:8	1,5	162,5
NHL_25T	1:4	1:0,25:8	1,3	163,3
NHL_10L	1:0,07:4	1:0,1:8	1,5	161,5
NHL_25L	1:4	1:0,25:8	1,3	159,3

As argamassas foram aplicadas em sistema de reboco em painéis com dimensões de 200x50 [cm] em muretes de alvenaria de tijolo furado corrente no âmbito de três dissertações de mestrado [11, 12, 13]. Foram usadas umas guias para separação entre painéis no estado fresco e para uniformizar a sua espessura total. Os muretes experimentais encontram-se na Estação de Exposição Natural do Departamento de Engenharia Civil da FCT UNL, localizada no Monte da Caparica, em zona semi-rural, a cerca de 3 km da costa Atlântica. Possuem uma face exposta a Norte, em constante sombreamento, e outra exposta a Sul, com exposição solar e incidência predominante da chuva e do vento.

Previamente à aplicação do crespido procedeu-se a uma aspersão da superfície da alvenaria de tijolo com água. O crespido foi aplicado com pequena espessura, de forma irregular e foi deixado secar durante um mínimo de 24 horas após as quais se procedeu à aplicação da camada de base do reboco. A superfície da camada de base foi acabada à talocha. Não foi aplicada qualquer camada de acabamento, pelo que a superfície dos rebocos apresenta-se algo rugosa. Os rebocos totalizaram uma espessura na ordem dos 2 cm. Durante a secagem não ocorreu qualquer fendilhação visível nos rebocos.

3. ENSAIOS E RESULTADOS

Os ensaios foram realizados entre os 28 e os 60 dias de idade dos rebocos aplicados nos muretes experimentais. A essa data não se detetou nenhuma deterioração relevante, mas a superfície das camadas de base mantinha-se bastante rugosa.

Realizaram-se ensaios de forma a caracterizar *in situ* as argamassas de reboco relativamente às suas características mecânicas, em termos de dureza superficial, por esclerómetro pendular, e deformabilidade, pelo equipamento Martinet-Baronnie, à absorção de água sob baixa pressão, por

tubos de Karsten, e à compactidade, através da velocidade de ultra-sons [14].

Para o ensaio de dureza superficial foram realizadas 16 leituras do retorno do pendulo do esclerómetro pendular Schmidt PT em pontos aleatórios divididos em quatro zonas de cada painel de reboco: zona superior, duas zonas intermédias e zona inferior. Os resultados são expressos em graus Vickers.

No ensaio de deformabilidade, colocou-se o equipamento de Martinet-Baronnie perpendicularmente ao murete, em pontos aleatórios e representativos do painel de reboco, e libertou-se a esfera, repetindo-se este processo seis vezes em cada painel. Com o auxílio de uma craveira digital mediu-se, em mm, o diâmetro de cada deformação que a esfera deixou no reboco.

O procedimento de ensaio velocidade de propagação de ultra-sons foi realizado seguindo o procedimento descrito na ficha de ensaio do LNEC FE Pa 43 [15]. O aparelho utilizado foi o Pundit (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) Lab da Proceq, com transdutores semi-exponenciais de 54 kHz. À semelhança do efetuado para os tubos de Karsten, o procedimento de ensaio repetiu-se, em cada painel de reboco, a três cotas do topo da fundação: 0,5m, 1m e 1,5m. A cada cota realizou-se um mínimo de três medições conforme o esquema da Figura 2. Determinou-se a velocidade média de propagação de ultra-sons (V_{us}) fazendo a média do quociente entre a distância entre os transdutores e o tempo medido pelo aparelho, de acordo com a equação 1.

$$V_{US} = \frac{d}{t} \text{ [m/s]} \quad (1)$$

em que

V_{us} – velocidade de propagação de ultra-sons [m/s];

d – distância entre os transdutores [m];

t – tempo medido [s].

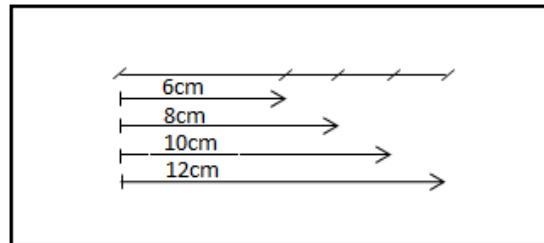


Figura 2. Esquema das medições do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons a cada cota de cada painel de reboco.

A realização do ensaio de absorção de água sob baixa pressão teve por base a ficha de ensaio Fe Pa 39 do LNEC [16] e o Test nº II.4 da RILEM [17]. Foram colados tubos de Karsten bem vedados em três cotas distintas de cada painel de reboco, a partir do topo da respetiva fundação: 0,5m, 1m e 1,5m, conforme a Figura 3 – as mesmas cotas a que previamente se tinha aferido a velocidade por ultra-sons. O coeficiente de absorção de água foi determinado através da medição do tempo decorrido até serem absorvidos 4ml. O cálculo do coeficiente de absorção (CA) é realizado segundo a equação 2.

$$CA = \frac{m}{d^2 \times \frac{\pi}{4} \times \sqrt{t}} \quad (2)$$

em que

CA – coeficiente de absorção [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$];

m – massa de água absorvida [4 ml ~0,004 kg];

d – diâmetro da secção de absorção [m];

t – duração da leitura [s].

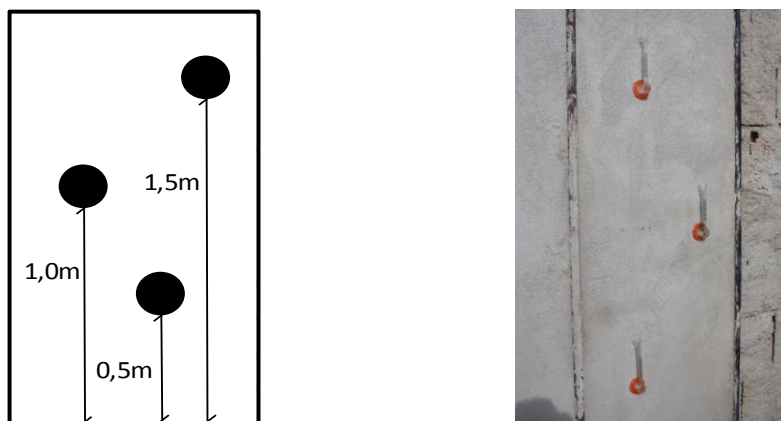


Figura 3. Cotas e esquema de montagem dos tubos de Karsten em cada painel de reboco.

Os resultados da dureza superficial por esclerómetro, do diâmetro de deformação pelo Martinet-Baronnie, a velocidade de ultra-sons e o coeficiente de absorção de água sob baixa pressão são apresentados na Tabela 2, em função da exposição a Norte ou Sul de cada painel de reboco de argamassa.

4. DISCUSSÃO

Os valores da dureza superficial obtidos com o esclerómetro pendular estão representados na Figura 4. Maiores valores de dureza superficial representam maior resistência superficial da argamassa. Analisando-se os resultados da Figura 4, constata-se que o aumento da percentagem de Mk em substituição da cal aérea e da cal hidráulica natural traduz um acréscimo dos valores de dureza superficial. Nas argamassas de NHL com traço mais fraco em ligante mas com adição resíduos cerâmicos, verifica-se que a adição de maior percentagem de resíduo de tijolo T e de ladrilho L provoca um aumento dos valores da dureza superficial. O acréscimo dos valores da dureza é mais acentuado com a adição de L comparativamente a T. De registar que não se observam diferenças significativas da dureza superficial devido à exposição Norte ou Sul dos painéis de reboco.

Comparando entre os tipos de argamassas de reboco, verifica-se que as argamassas de cal aérea com 10% e 20% de substituição de cal por Mk é a que apresenta dureza mais elevada. De entre as argamassas com cal hidráulica natural, a adição de resíduos cerâmicos a um traço mais fraco em ligante (1:4) conduz a mais elevada dureza superficial comparativamente a argamassas do mesmo ligante com um traço 1:3, sem ou com baixas substituições de cal por Mk.

Os valores dos diâmetros (ϕ) obtidos recorrendo ao ensaio de deformabilidade, que ocorreram sem fendilhação adjacente, estão apresentados na Figura 5. Através deste ensaio relaciona-se o diâmetro da deformação provocada pela esfera do equipamento de ensaio com a resistência da argamassa ao impacto. Quanto maior o diâmetro, sem fendilhação adjacente, maior a deformabilidade.

Tabela 2. Dureza superficial, diâmetro da deformação, coeficiente de absorção e velocidade de ultra-sons de cada painel de argamassa de reboco em cada exposição.

Argamassa	Exposição	DS _E [Vickers]	ϕ [mm]	V _{US} [m/s]	CA _{4ml} [kg/(m ² ·s ^{0,5})]
CL	Norte	56,3±2,6	18,0±0,9	822±78	0,57±0,13
	Sul	59,2±2,4	20,7±2,1	862±64	0,69±0,05
CL_10Mk	Norte	67,8±2,2	14,2±0,8	957±84	0,65
	Sul	66,9±2,8	15,5±2,1	967±89	0,68±0,22
CL_20Mk	Norte	70,5±2,3	12,6±0,8	1008±69	0,65
	Sul	72,9±2,3	12,8±0,8	967±89	0,58±0,01
NHL	Norte	33,3±4,8	8,7±0,5	919±47	0,34
	Sul	37,4±3,1	9,8±1,2	1223±132	0,58
NHL_2,5Mk	Norte	44,4±5,2	7,6±0,4	941±59	0,55±0,18
	Sul	46,6±4,0	9,4±0,8	1188±107	0,26±0,00
NHL_5Mk	Norte	49,8±1,7	8,4±0,5	944±59	0,43
	Sul	48,9±3,1	10,2±0,5	1188±107	0,43
NHL_10T	Norte	47,7±2,0	10,5±0,4	1770±271	-
	Sul	49,2±1,6	9,8±1,2	1515±176	0,31
NHL_25T	Norte	55,1±3,4	10,4±0,7	1650±153	0,35
	Sul	55,4	9,4±0,8	1616±130	0,34
NHL_10L	Norte	57,0±2,9	9,9±0,2	1728±226	0,29±0,00
	Sul	57,0±1,9	10,2±0,5	1484±125	0,28±0,03
NHL_25L	Norte	64,8±2,7	10,1±1,0	1598±146	0,29
	Sul	65,1±1,8	13,3±0,8	1701±194	0,51

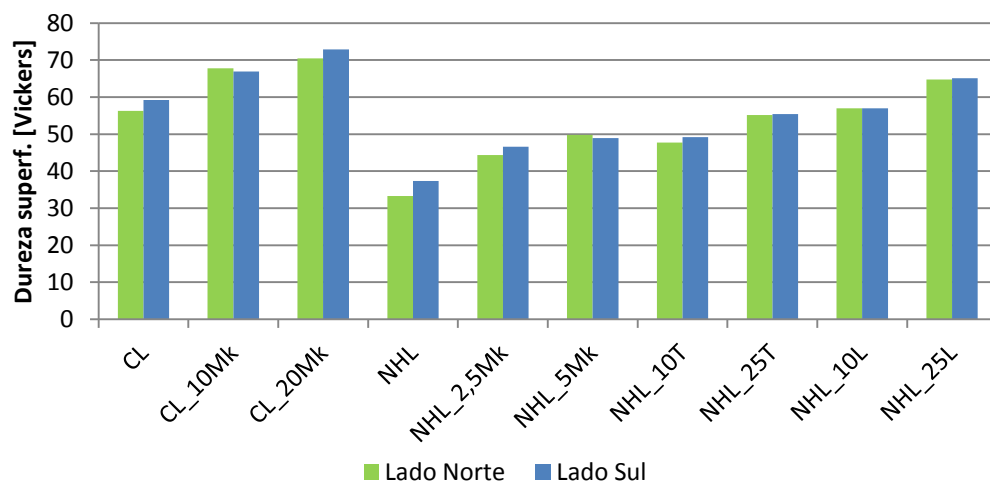


Figura 4. Dureza superficial dos rebocos por esclerómetro pendular.

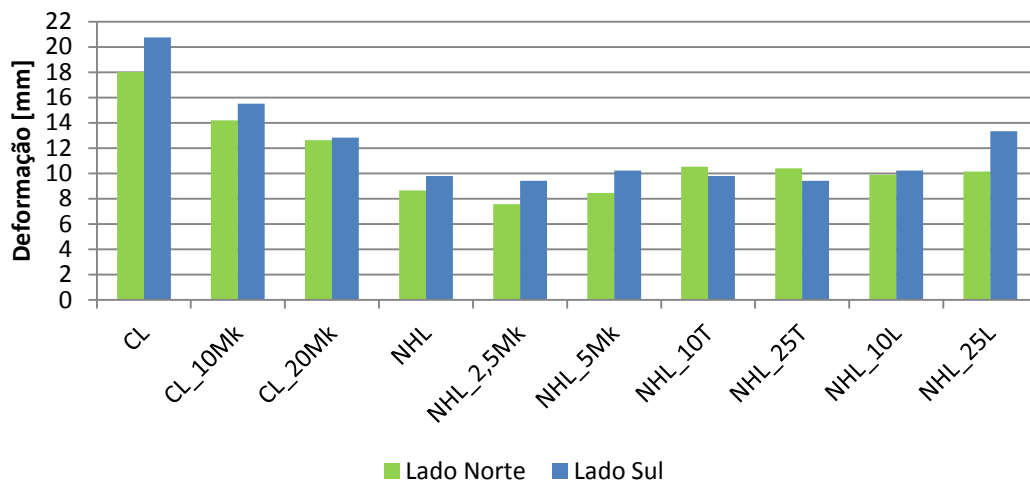


Figura 5. Diâmetro da deformação nos rebocos por impacto com equipamento Martinet-Baronie.

Da análise dos resultados da figura 5 verifica-se que, nas argamassas com cal aérea e com cal hidráulica natural sem e com Mk, a deformação ocorrida tem tendência a ser maior nos painéis dos muretes expostos a Sul, comparativamente aos expostos a Norte. As argamassas de reboco com cal aérea CL são as que registam maior deformação. Nestas argamassas CL observa-se uma relação inversa entre o diâmetro da deformação e a percentagem de Mk. Com efeito, a substituição de cal CL por Mk tende a reduzir a deformação ocorrida.

As argamassas de cal hidráulica natural NHL ao traço 1:3 são as que apresentam menor deformação. Verifica-se que a influência da substituição e baixas percentagens de NHL por Mk tem pouca influência nos resultados deste ensaio. No entanto a substituição de NHL por 5% de Mk parece conduzir ao melhor compromisso entre as três dosagens analisadas.

Com a adição de percentagens de resíduos cerâmicos T e L às argamassas com traço inicial 1:4 de NHL a deformação mantém-se aproximadamente constante. A exceção é a argamassa com adição de 25% de resíduo L no painel exposto a Sul, onde a deformação aumenta significativamente, atingindo valores comparáveis com argamassas de cal aérea com substituições por Mk. De qualquer modo, comparando os rebocos de argamassas com NHL com base no traço inicial 1:4 com adição de resíduos cerâmicos com os rebocos de argamassas com o mesmo ligante mas com traço 1:3, verifica-se que, embora tendo apresentado maior dureza superficial avaliada pelo esclerómetro, as argamassas com resíduos cerâmicos apresentam maior deformabilidade nos rebocos expostos a Norte e valores comparáveis a mais elevados nos expostos a Sul.

Os valores das velocidades de propagação de ultra-sons obtidos no ensaio respetivo estão representados na Figura 6. Este ensaio baseia-se no princípio que a velocidade é tanto maior quanto maior a compacidade da argamassa. Assim, um maior valor de velocidade pode sugerir uma argamassa mais compacta e, assim, mais resistente [15]. Da mesma forma, um baixo valor de velocidade pode indicar a presença de fissuração ou deficiências de aderência na argamassa.

Analisando de uma forma geral a Figura 6 observa-se que as argamassas de cal aérea apresentam gamas mais baixas de velocidade, enquanto as argamassas com base no traço 1:4 de cal hidráulica natural com adições de resíduo cerâmico apresentam os valores de velocidade mais elevados. As argamassas também de NHL mas ao traço 1:3 apresentam um pouco mais disparidade entre os resultados obtidos na exposição a Norte e a Sul. Com efeito estas argamassas registaram valores mais baixos de velocidade nos painéis expostos a Norte e valores intermédios entre os outros grupos de argamassas nos painéis expostos a Sul. No entanto, a variação da velocidade entre as argamassas NHL com traço 1:3, sem ou com Mk, é muito pequena em cada exposição.

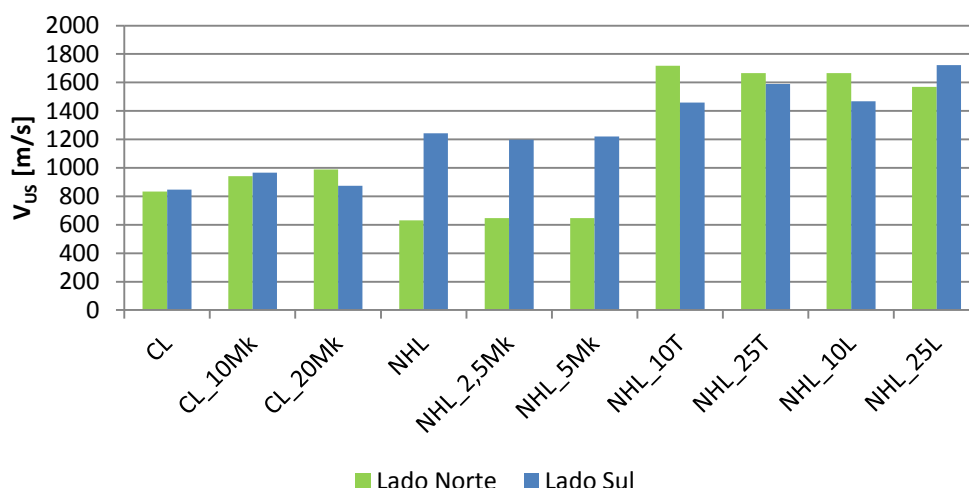


Figura 6. Velocidade de propagação dos ultra-sons nos rebocos.

No caso das argamassas com cal aérea, para ambas as exposições a velocidade aumenta com a percentagem de Mk. As argamassas de cal aérea sem ou com Mk não apresentam variação significativa face à exposição.

Nas argamassas NHL com resíduos de cerâmica registam-se valores genericamente mais elevados que a Norte (exceto com 25% de adição de L). Enquanto a Sul a velocidade aumenta com a percentagem de adição, a Norte ocorre o inverso.

Relacionando a dureza superficial com a velocidade de ultra-sons (Figuras 4 e 6) observa-se que nos rebocos de argamassa de cal aérea existe uma relação crescente do teor de substituição de CL por Mk com a compacidade e consequente resistência das argamassas.

Os valores do coeficiente de absorção de 4ml de água, obtidos através do ensaio com tubos de Karsten, estão representados na Figura 7. Maior coeficiente de absorção significa mais rápida absorção de água por exemplo da chuva, quando o reboco está exposto; de um modo geral devem representar maior porosidade aberta.

Observando genericamente a Figura 7 verifica-se que os rebocos de argamassas de cal aérea apresentam a mais rápida absorção de água, enquanto os das argamassas de NHL com resíduos de cerâmica indiciam ter a absorção mais lenta. No entanto, alguns problemas ocorreram ao longo da realização deste ensaio. Com efeito os ensaios decorreram em janeiro de 2014, numa altura do ano em que as condições climáticas se mantiveram durante várias semanas muito húmidas – o que até atrasou a realização de muitos ensaios mas particularmente deste, onde era necessário algum nível de secagem da superfície para se conseguir uma boa fixação e vedação dos tubos de Karsten nos painéis de reboco. Por esse motivo, e também devido à rugosidade da camada de base do reboco, alguns resultados não expressam a média de três ensaios realizados em cada painel mas apenas de um ou dois; inclusive nenhum ensaio se conseguiu completar no caso do painel com argamassa de reboco de NHL ao traço 1:4 com adição de 10% de resíduos cerâmico T, exposto a Norte. Neste painel, a rugosidade da superfície permitia que a água contornasse a zona de selagem dos tubos de Karsten, inviabilizando o ensaio.

Nas argamassas com cal aérea CL a variação ocorrida permite inferir que a substituição de cal por Mk parece ter efeitos algo benéficos em exposição a Sul e um pouco prejudiciais em exposição a Norte. No entanto, e considerando que em casos reais a mesma argamassa de reboco será aplicada em várias exposições, a variação indicia ser pouco significativa.

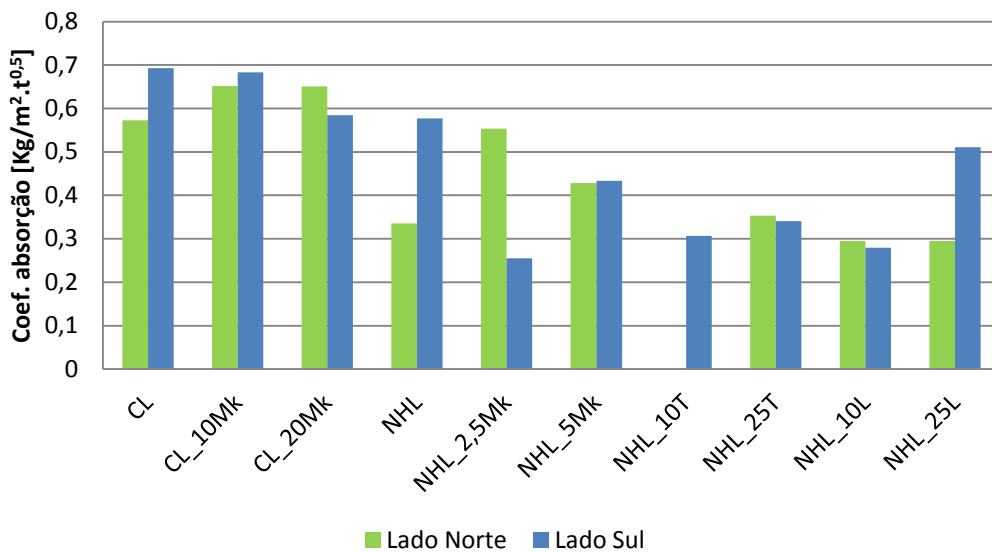


Figura 7. Coeficiente de absorção de 4 ml de água sob baixa pressão dos rebocos.

Nas argamassas com NHL ao traço 1:3 a variação de resultados ocorrida justifica a realização de uma nova campanha experimental. No entanto a substituição de NHL por 5% de Mk, com valores intermédios entre as argamassas CL e NHL com resíduos, apresenta valores muito semelhantes a Norte e a Sul.

As argamassas de NHL ao traço 1:4 com adição de resíduos surgem como as melhores em termos de resistência à absorção de água.

Ao comparar os valores obtidos nos ensaios de absorção de água e deformabilidade das argamassas, observou-se (nas figuras 5 e 7) que as tendências sensivelmente se mantêm, corroborando o facto de, possivelmente, uma maior absorção de água e uma maior deformação corresponderem a maior porosidade aberta.

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos com a caracterização não destrutiva dos rebocos de argamassas em muretes experimentais conclui-se que:

- A substituição parcial de cal aérea ou cal hidráulica por metacaulino conferiu maior dureza superficial e diminuiu a deformabilidade. Esta diminuição foi no entanto pouco significativa em argamassas de cal hidráulica natural. Nas argamassas de cal aérea, e muito embora a diminuição da deformabilidade, a substituição de cal por metacaulino apontou também um aumento da compacidade, que indicia um aumento das respetivas resistências mecânicas, sem alterações significativas em termos de potencial para resistir à absorção da água da chuva quando sem proteção.
- A adição de dois resíduos cerâmicos em argamassas com traço fraco em cal hidráulica natural aumentou a dureza superficial para valores superiores a argamassas com traço mais forte da mesma cal hidráulica natural e eventuais adições de metacaulino. No entanto, a adição de resíduos cerâmicos manteve a deformabilidade das argamassas, chegando mesmo a aumentá-la comparativamente às argamassas com traço mais forte da mesma cal. A adição de resíduos cerâmicos apontou ainda para um aumento da compacidade das argamassas face a todas as outras argamassas, que talvez se possa dever a efeito, pelo menos parcial, de filler das adições. Este aumento da velocidade indicia um aumento das respetivas resistências mecânicas. As

adições de resíduos cerâmicos conferiram muito bom comportamento das argamassas face à absorção de água da chuva e comparativamente às restantes argamassas.

As argamassas com base em cal aérea são reconhecidas como compatíveis e adequadas para a conservação e reabilitação de alvenarias antigas. Comparando aspetos relacionados com as características mecânicas dos rebocos de argamassas com cal hidráulica natural com as dos rebocos de argamassas com base em cal aérea, parece poder inferir-se que, particularmente as argamassas de cal hidráulica natural com baixo teor de ligante e adição de resíduos cerâmicos, aparentam ser adequadas para este tipo de aplicações. Ressalta também como muito positivo o potencial do seu comportamento face à água da chuva.

Estas características técnicas, associadas à questão ecológica anteriormente referida de possibilidade de formulação de argamassas com menor energia incorporada, apontam para o interesse na continuidade do estudo, com vista à otimização deste tipo de argamassas.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Lusical pela disponibilização e transporte da cal aérea H100, à Secil pela disponibilização da cal hidráulica natural NHL3.5, à Imerys pela disponibilização do metacaulino, através do Doutor António Santos Silva do LNEC, e à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento ao projecto EXPL/ECM-COM/0928/2012.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Faria, V. Silva e T. Madeira, "Natural hydraulic lime mortars with ceramic residues for masonry", in *9th International Masonry Conference*, 7-9 July 2014, Univ. Minho, Guimarães (aceite para publicação).
- [2] T. Fontes, P. Faria e V. Silva, "Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino e resíduo cerâmico", in *Congresso Construção 2012*, 2012 (CD).
- [3] P. Faria, "Resistência aos cloretos e aos sulfatos de argamassas de cal aérea e diferentes pozolanas", in *COMPASS Seminar – Soluble salts in Old Buildings – Damage, Processes and Solutions*, 2005, pp. 9.1-9.14.
- [4] P. Faria, V. Silva e I. Flores-Colen, "Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial", in *4º Congresso de Argamassas e ETICS*, 2012 (CD).
- [5] A. Sousa-Coutinho, "Pozolanas, betões com pozolanas e cimentos pozolânicos", *Memória* 136, LNEC, 1958.
- [6] A.E. Charola, P. Faria-Rodrigues, A.R. McGhie e F.M. Henriques, "Pozzolanic components in lime mortars: correlating behaviour, composition and microstructure", *Int. J. for Restoration of Buildings and Monuments*, vol.11 (2), pp.111-118, 2005.
- [7] G. Matias, P. Faria e I. Torres, "Viability of ceramic residues in lime-based mortars", in *HMC2013 – Historic Mortars Conference*, 2013 (CD).
- [8] IPQ, NP EN 459-1: 2011 (e errata 2012) - *Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. Caparica, 2011.
- [9] A. Gameiro, A. Santos Silva, P. Faria, J. Grilo, T. Branco, R. Veiga e A. Velosa, "Physical and chemical assessment of air lime-metakaolin mortars. Influence of binder:aggregate ratio", *Cement and Concrete Composites*, vol. 45, pp. 264-271, 2014.
- [10] J. Grilo, A. Santos Silva, P. Faria, A. Gameiro e R. Veiga, A. Velosa, "Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions", *Construction and Building Materials*, vol. 51, 287-294, 2014.

- [11] D. Vargas, “Argamassas de cal aérea e metacaulino. Influência do traço e da cura”. *Dissertação de Mestrado em Eng. Civil*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [12] J. Valério, “Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5. Influência do traço e da cura”. *Dissertação de Mestrado em Eng. Civil*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [13] T. Madeira, “Argamassas de cal hidráulica NHL3.5 com resíduos cerâmicos”. *Dissertação de Mestrado em Eng. Civil*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [14] A.C. Magalhães, D. Costa e M.R. Veiga, “Diagnóstico de anomalias de revestimentos de paredes com técnicas de ensaio in situ. Avaliação da resistência mecânica”, in *3º ENCORE - Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*, 2003.
- [15] LNEC, FE Pa 43 - *Ficha de ensaio para revestimento de paredes. Ensaio de avaliação de características mecânicas por ultra-sons*, Lisboa, 2010.
- [16] LNEC, FE Fe Pa 39 – *Ficha de ensaio para revestimento de paredes. Ensaio de absorção de água sob baixa pressão*, Lisboa, 2002.
- [17] RILEM, “Test n.º II.4 - Water absorption under low pressure. Pipe method”. *Materials & Structures*, vol. 13 (75), 1980.